E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 7, Number 2, 2022

Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of dissimilar AA2024-AA6061 joints

S.Z.Anvari[1*], M. Khandozi[2]

1-Department of Mechanical and Metallurgy Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran
2-Department of Mechanical Engineering, Daneshpajoohan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran

Received 16 December 2021 ; Accepted 23 January 2022

Abstract

In the present study, to resolve the problems in fusion welding methods as well as to increase the strength, FSW method was used to join aluminum alloy sheets 6061 and 2024. Moreover, optimal parameters for joining of these two alloys were also taken into consideration. Various tool rotation speeds of 565, 950 and 1500 rpm were selected. For each tool rotation speed, two traverse speed variables, two penetration depth variables, and two tool angle variables were specified. The analysis of mechanical properties of welded samples was conducted through tensile and micro-hardness tests. Furthermore, microstructure of welding zone was investigated using optical and electron microscopes. The ratio of shoulder diameter to pin diameter is among the most significant and practical factors for welding tools. So, a shoulder diameter three times larger than that of pin diameter was selected. In the present study, alloy 2024 was placed at the precursor as the harder alloy. Tensile strength and indentation hardness of optimal specimen 300 MPa and 85 HV were achieved. Moreover, hardness behavior and tensile strength of heat-affected zone (HAZ) was evaluated to be lower in alloy 6061 compared to other zones.

Keywords: Friction stir welding, Aluminum alloys, AA2024, AA6061.

* Corresponding Author: szanvari@pnu.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400

تاثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال های غیرمشابه آلیاژهای آلومینیم AA2024-AA6061

سیده زهرا انوری[1*]، میثم خاندوزی[2]

1- گروه مهندسی مکانیک و مهندسی متالورژی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

2- گروه مهندسی مواد، موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران.

دریافت مقاله: 1400/09/25؛ پذیرش مقاله: 1400/11/03

چکیده

در این پژوهش در راستای رفع مشکلات روش‌های جوشکاری ذوبی و افزایش استحکام، اتصال ورق‌های آلیاژهای آلومینیم 6061 و 2024 با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شد و بهینه پارامترهای ممکن برای اتصال این دو آلیاژ مورد بررسی قرار گرفت. سرعت‌های متفاوت چرخش ابزار 565، 950 و 1500 rpm برای اتصال این دو آلیاژ انتخاب شد. برای هر سرعت چرخش ابزار دو متغیر سرعت پیشروی، دو متغیر عمق فروروی و دو متغیر زاویه ابزار در نظر گرفته شد. آنالیز خواص مکانیکی اتصال‌های جوشکاری شده توسط بازرسی چشمی جوش و آزمون‌های کشش و میکروسختی صورت گرفت. ریزساختار منطقه جوش توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مورد پایش قرار گرفت. نسبت قطر شانه به قطر پین از فاکتورهای مهم و کاربردی ابزار جوشکاری است و قطر شانه 3 برابر قطر پین انتخاب شد. در این پژوهش آلیاژ 2024 به عنوان آلیاژ سخت تر در سمت پیشرونده قرار گرفت. در نهایت استحکام کششی و سختی سنجی نمونه بهینه 300MPa و 85 HV بدست آمد و رفتار سختی و استحکام کششی منطقه HAZ در سمت آلیاژ 6061 نسبت به بقیه مناطق پایین‌تر ارزیابی شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژهای آلومینیم، آلیاژ AA2024، آلیاژ AA6061.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: szanvari@pnu.ac.ir

1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیم دارای نسبت استحکام به وزن و مقاومت در برابر ترک ناشی خوردگی تنشی بالایی هستند. این آلیاژها در کاربردهای زیادی نظیر صنایع هوا-فضا، خودروسازی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [1-4]. یکی از بزرگترین موانع برای استفاده گسترده از اتصالات آلومینیمی در صنایع هوا-فضا محدودیت در ایجاد اتصالات با استحکام بالا و مقاوم به خستگی و شکست است. برخی از آلیاژهای آلومینیم به دلیل میکروساختار ضعیف‌و متخلخل ناحیه جوش، در دسته آلیاژهای جوش ناپذیر طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین افت خواص مکانیکی منطقه جوش در مقایسه فلزپایه از دیگر مشکلات جوشکاری آلیاژهای آلومینیم محسوب می‌شود. همه این عوامل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

باعث گردیده است که استفاده از فرایندهای جوشکاری معمولی در این آلیاژها مورد توجه قرار نگیرد [5]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یکی از فرایندهای جوشکاری حالت جامد است که برای جوشکاری بسیاری از آلیاژها به خصوص آلیاژهای آلومینیم، مس و منیزیم مورد توجه قرار گرفته است [6]. در فرایند FSW جوشکاری در دمای زیر دمای انجماد انجام می‌شود بنابراین حین فرایند اتصال، ذوب رخ نمی‌دهد و بسیاری از عیوب نظیر تخلخل، جدایش و عیوب انجمادی ایجاد نمی‌شود [7-9]. این فرایند می‌تواند انتخاب مناسبی برای اتصال آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و آلیاژهای استحکام بالای سری 2xxx و سری 7xxx باشد. از دیگر مزایای فرایند FSW امکان اتصال آلیاژهای غیرمشابه است [10-13]. آمانسیو و همکاران [14] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیم 2024 و 6056 با استفاده از فرایند FSW پرداختند و پارامترهای بهینه فرایند را براساس ارزیابی ریزساختار و میکروسختی به صورت سرعت چرخشی 800rpm و سرعت جوشکاری 15 mm/min به دست آوردند. کومار و همکاران [15] فرایند FSW را برای اتصال آلیاژهای آلومینیم 6061 و 6082 انتخاب کردند و پارامترهای بهینه فرایند را بررسی کردند. به دلیل اختلاف خواص دو آلیاژ توزیع میکروسختی‌در اطراف ناحیه اتصال به صورت غیرمتقارن به دست آمد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که با افزایش سرعت چرخش ابزار استحکام کششی افزایش یافت. همچنین کومار و همکارانش اخیرا در تحقیقی [16] تاثیر شکل پین بر اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیم 6061 و 5083 را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با تغییر شکل پین و همچنین تغییر سرعت چرخش و سرعت جوشکاری امکان دستیابی به استحکام بالاتر وجود دارد. جانت و همکاران [17] خواص مکانیکی و استحکام و شکل پذیری جوشکاری دو آلیاژ6061 و 5083 به روش FSW را با جوشکاری روش‌های ذوبی نظیر TIG و MIG با استفاده از جریان ثابت و جریان پالسی مقایسه کردند. خواص مکانیکی از قبیل استحکام و شکل پذیری و ابعاد و نحوه پخش شدن رسوبات در جوشکاری به روش FSW بسیار بهتر از روش‌های ذوبی از قبیل TIG و MIG گزارش شد. از لحاظ مقایسه میکروسختی بین جوش و HAZ نیز روش اصطکاکی اغتشاشی از روش‌های ذوبی نتایج بهتری را نشان داد.آلیاژهای 6061 و 2024 به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا و صنایع دریایی و خطوط لوله و مخازن ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرند و با توجه به این وسعت کاربرد، اتصال آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیم اجتناب ناپذیر است. در این تحقیق فرایند جوشکاری FSW بدلیل خواص مکانیکی و ریزساختاری بهتر نسبت به روش‌های ذوبی مورد استفاده قرار گرفت. در راستای اتصال آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیم پژوهشگران زیادی در دنیا در حال فعالیت می‌باشند و با مطالعه و بررسی این پژوهش‌ها نیاز صنایع مذکور به بررسی دقیق در جهت ارتقاء خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال آلیاژهای 2024و 6061 به روش FSW احساس می‌شود. بنابراین هدف این پژوهش بررسی عملی تغییرات در پارامترهای اصلی فرایند جوشکاری در جهت رسیدن به بهینه خواص مکانیکی و ریزساختاری تعریف شده است.

2- مواد و روش انجام آزمایش

در این تحقیق ورق آلیاژهای آلومینیم 6061 و 2024 به ضخامت 4 میلی‌متر به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی آلیاژهای ذکر شده توسط دستگاه کوانتومتری برحسب درصد وزنی و ترکیب شیمیایی نمونه‌های استاندارد در جداول (1 و2) آورده شده است. در انجام فرایند متغیرهای سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی و زاویه ابزار با قطعه و همچنین میزان فروروی ابـزار در قطعه مطابق با جدول (3) برنامه‌ریزی شد. پارامترهای انتخاب شده در این تحقیق براساس تحقیقات پیشین و آزمایش‌های اولیه انتخاب شد. جوشکاری توسط دستگاه فرز عمودی ساخت کشور لهستان و مدل آن FNF-4F انجام شد. مطابق تحقیقات انجام شده در مرجع [18] بهترین راندمان برای پین استوانه‌ای رزوه دار و با نسبت قطر شانه به قطر پین 3 به دست آمده است بنابراین ابزار مطابق شکل(1) طراحی و مورد استفاده قرار گرفت.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 6061.

عنصر شیمیایی (درصد وزنی)	Si	Zn	Cu	Fe	Mg	Cr	Al
ترکیب شیمیایی نمونه	۰/۷۵	۰/۱۸	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۱۲	مابقی
ترکیب شیمیایی نمونه استاندارد	۰/۰-۴/۸	۰/۲۵	۰/۰-۱۵/۴	۰/۷	۰/۱-۸/۲	۰/۰-۰۴/۳۵	مابقی

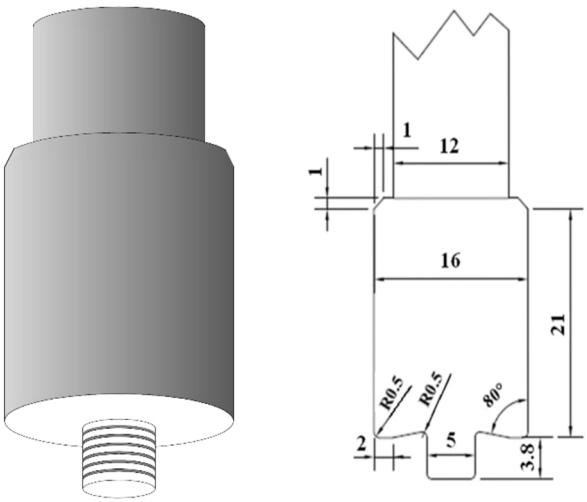
جدول 2- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 2024.

عنصر شیمیایی (درصد وزنی)	Si	Zn	Cu	Fe	Mg	Mn	Al
ترکیب شیمیایی نمونه	۰/۴۲	۰/۲۳	۴/۷۸	۰/۴۴	۱/۲۵	۰/۰۴	مابقی
ترکیب شیمیایی نمونه استاندارد	۰/۵	۰/۲۵	۳/۴-۸/۹	۰/۵	۱/۱-۲/۸	۰/۰-۳/۹	مابقی

ابزار مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد گرمکار H13 با قطر پین 5 mm و ارتفاع پین 3/8 mm انتخاب شد. به منظور اندازه‌گیری و بررسی رفتارسختی نمونه‌ها و همچنین مقایسه تغییرات سختی در هر حالت آزمون ریزسختی سنجی ویکرز و مقدار بار اعمالی 500 گرم انجام گرفت. اندازه‌گیری سختی نمونه‌های جوشکاری شده توسط دستگاه ریزسختی سنجی Buhler مدل Micromet مطابق با استاندارد ASTM-E-384-11 انجام گرفت. نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-E8M-04 بوسیله دستگاه وایرکات آماده سازی شده‌اند. آزمایش کشش در دمای اتاق به‌وسیله دستگاه کشش Hounsfield با سرعت 1 mm/min در راستای عمود بر جوش انجام گرفت. جهت مطالعات میکروسکوپی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل VEGA-XMU ساخت شرکت TESCAN استفاده شد. با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری (Image j) اندازه دانه برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد.

3-نتایج و بحث

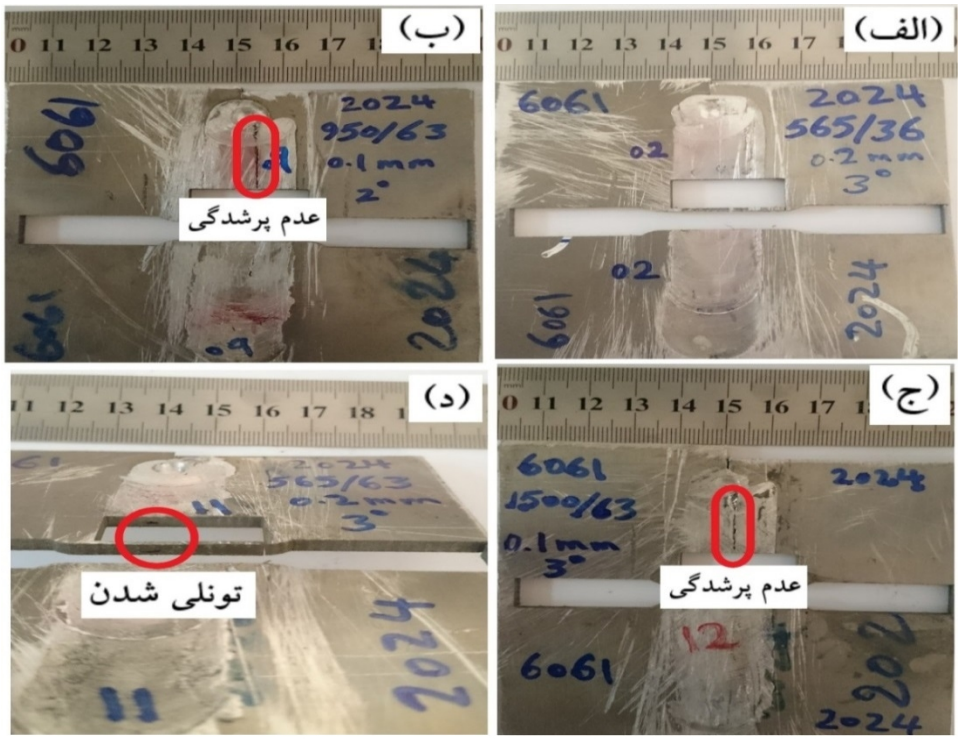
شکل(2) عیوب جوش ایجاد شده در جوشکاری آلیاژ 6061 به 2024 را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل (2-ب) و (2-ج) مشخص است در نمونه‌های 9 و 12 بدلیل کاهش عمق فروروی پین عدم پرشدگی جوش اتفاق افتاده است. گرمای اصطکاکی ناکافی حاصل از اصطکاک بین پین و قطعه کار عامل عدم پرشدگی است. این عیب در سمت آلیاژ 2024 که در سمت پیشرونده قرار دارد بیشتر اتفاق افتاد که در محل تداخل دو آلیاژ قرار گرفته است. شکل 2(د) عیب تونلی شدن را نشان داده که در سمت آلیاژ 6061 بوجود آمده است. این عیب‌در اثر نامناسب بودن بعضی‌از پارامترهای جوشکاری از قبیل سرعت چرخش ابزار، سرعت جوشکاری و میزان عمق فروروی بوجود آمده است. حرارت ورودی ناکافی و یا بیش از حد باعث ایجاد عیوبی نظیر عدم پرشدگی و تونلی شدن می‌شود [19]. با طراحی مناسب بین پارامترها مانند نمونه 2 (شکل2-الف) عیوب مذکور مشاهده نشد.



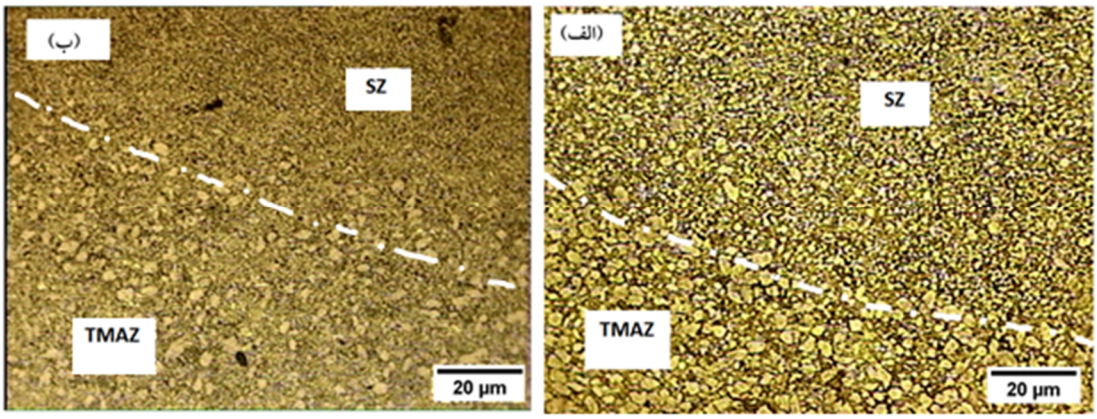
شکل 1- نمای شماتیک از ابزار استوانه‌ای رزوه دار (ابعاد برحسب میلی‌متر).

شکل (3) تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه اغتشاش و ناحیه ترمومکانیکال نمونه‌های 2 و 12 را نشان داده است. نمونه 12 با سرعت‌چرخش 1500 rpm جوشکاری شد. با افزایش سرعت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]



شکل 2- الف- نمونه 2 جوش بدون عیب ب- عیب عدم پرشدگی در نمونه 9، ج- عیب عدم پرشدگی در نمونه 12 و د- عیب عدم پرشدگی و تونلی شدن در نمونه 11



شکل 3- تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه جوش الف-نمونه 12 و ب- نمونه 2.

چرخش میزان تغییر شکل پلاستیکی افزایش یافته و باعث ریزدانه شدن ساختار شده است. طبق شکل (3-الف) در ناحیه ترمومکانیکی به ویژه در مرز با ناحیه اغتشاش به‌صورت جزئی دانه‌های تبلور مجدد یافته دیده می‌شود. ناحیه اغتشاش یا منطقه تبلور مجدد دینامیکی، حاصل تغییر شکل پلاستیکی شدید و گرمای ایجاد شده در فرایند بوده که باعث بوجود آمدن ناحیه‌ای با ریزساختار حاوی دانه‌های کوچک و تبلورمجدد یافته است.

این ناحیه معمولا حاوی چگالی زیادی از نابجایی، مرز فرعی و دانه فرعی بوده و در تماس مستقیم با ابزار می‌باشد و بیشترین میزان افزایش دما را تجربه می‌کند [7].

اندازه دانه منطقه جوش در جدول(4) آمده است. بررسی مقادیر متوسط اندازه دانه نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی و یا کاهش سرعت پیشروی ابزار، مقدار متوسط اندازه دانه افزایش‌یافته‌است. به عبارت‌دیگر با کاهش نسبت سرعت دورانی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

جدول.3- پارامترهای متغیر طراحی شده در فرایند جوشکاری.

شماره نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه ابزار (°)	عمق فروروی(mm)
۰۱	۹۵۰	۶۳	۲	۰/۲
۰۲	۵۶۵	۹۸	۳	۰/۲
۰۳	۵۶۵	۶۳	۳	۰/۲
۰۴	۹۵۰	۶۳	۳	۰/۱
۰۵	۹۵۰	۹۸	۳	۰/۲
۰۶	۱۵۰۰	۹۸	۳	۰/۲
۰۷	۹۵۰	۶۳	۳	۰/۲
۰۸	۵۶۵	۶۳	۳	۰/۱
۰۹	۹۵۰	۶۳	۲	۰/۱
۱۰	۱۵۰۰	۶۳	۳	۰/۲
۱۱	۵۶۵	۶۳	۲	۰/۲
۱۲	۱۵۰۰	۶۳	۳	۰/۱

به سرعت پیشروی اندازه دانه نیز کاهش یافته است. به عنوان نمونه در سرعت پیشروی 63 mm/min با افزایش سرعت دورانی از 565 به 1500 rpm اندازه دانه از 2/9 به 3/4 µm افزایش یافت. همچنین در سرعت دورانی ثابت با افزایش سرعت پیشروی از اندازه دانه کاسته شد. بنابراین کمترین اندازه دانه مربوط به نمونه جوشکاری شده در شرایط کمترین سرعت دورانی (565 rpm) و سرعت پیشروی 63 mm/min بود که این مقدار برابر با 2/9 µm می‌باشد. بیشترین اندازه دانه نیز مربوط به نمونه جوشکاری شده در شرایط بیشترین سرعت دورانی یعنی 1500 rpm بود. علت افزایش اندازه دانه، افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی، در نتیجه افزایش میزان گرمای ورودی و به دنبال آن افزایش دمای انجام فرایند ارزیابی شد. همانطور که از اندازه دانه‌ها مشخص است در سرعت پیشروی ثابت با افزایش سرعت چرخشی، اندازه دانه ناحیه اغتشاش نیز افزایش یافت. افزایش سرعت چرخشی دو اثر متفاوت بر اندازه دانه ناحیه اغتشاش خواهد داشت.

اول اینکه با افزایش سرعت چرخشی میزان حرارت ورودی افزایش خواهد یافت که باعث افزایش اندازه دانه ناحیه اغتشاش می‌شود و دوم اینکه با افزایش سرعت چرخشی، میزان تغییر شکل پلاستیکی افزایش خواهد یافت که این امر در نهایت باعث کاهش اندازه دانه می‌گردد. یکی‌از دو اثربه عنوان فاکتور غالب، تاثیر افزایش سرعت چرخشی بر اندازه دانه را مشخص خواهد کرد. با توجه به اندازه دانه بدست آمده، مشخص است که حرارت ورودی فاکتور تاثیرگذار و غالب است.

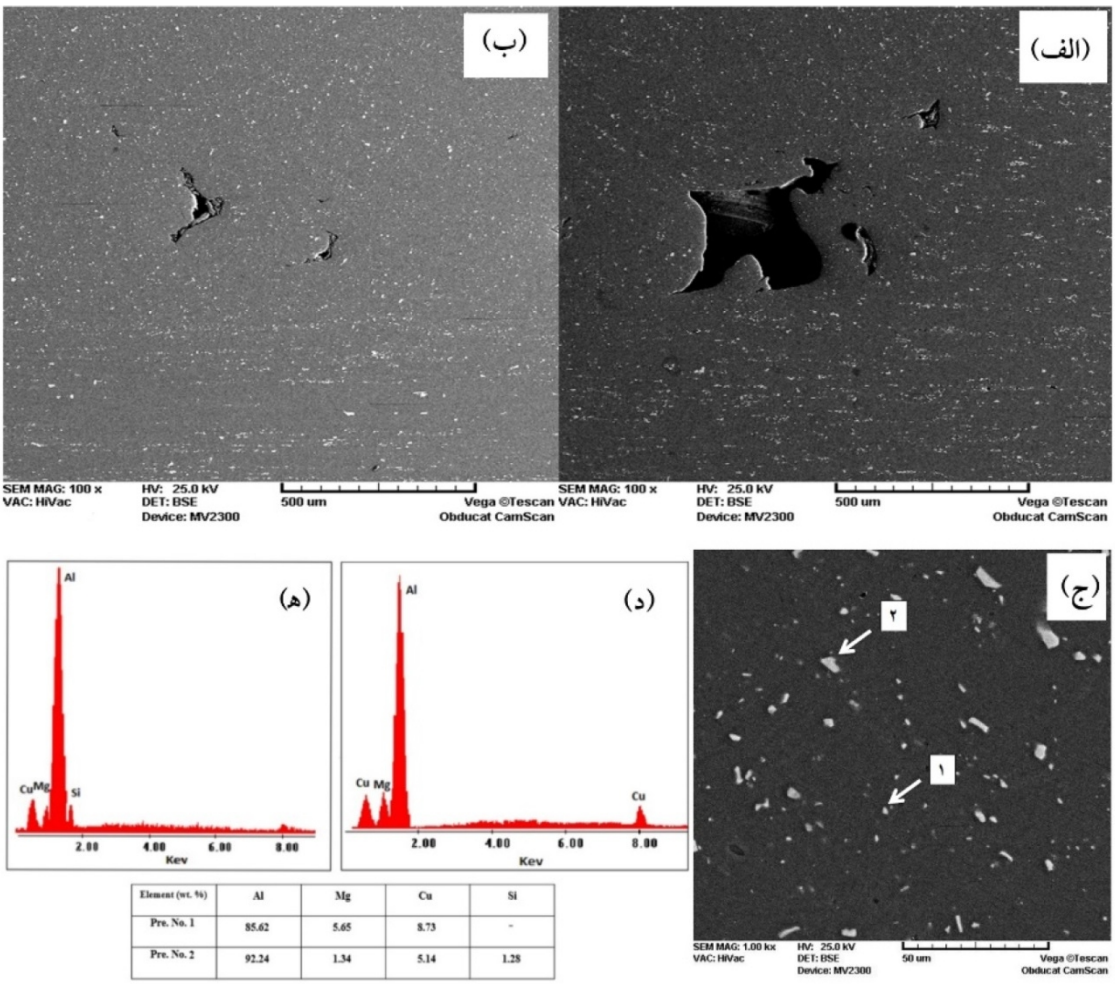
شکل (4-الف) و (ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه 8 و نمونه 11 را نشان می‌دهد. شرایط سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی در دو نمونه ثابت و به ترتیب برابر 565 rpm و 63 mm/min در نظر گرفته شد. نمونه 8 با زاویه 3درجه و عمق فروروی 0/1 mm و نمونه 11 با زاویه ابزار 2درجه و عمق فروروی 0/2 mm جوشکاری شد. همانطور که مشخص است با کاهش سرعت چرخش، اندازه رسوب افزایش یافته و به خوبی‌نمایان‌است که چون شرایط‌جوشکاری‌دو قطعه یکسان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

جدول4- اندازه دانه منطقه جوش اتصال آلیاژهای 2024 و 6061.

نمونه	۰۱	۰۲	۰۳	۰۴	۰۵	۰۶	۰۷	۰۸	۰۹	۱۰	۱۱	۱۲
سرعت چرخش (rpm)	۹۵۰	۵۶۵	۵۶۵	۹۵۰	۹۵۰	۱۵۰۰	۹۵۰	۵۶۵	۹۵۰	۱۵۰۰	۵۶۵	۱۵۰۰
سرعت پیشروی (mm/min)	۶۳	۹۸	۶۳	۶۳	۹۸	۹۸	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳
عمق فروروی(mm)	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱
اندازه متوسط دانه (µm)	۳/۷	۳/۴	۲/۹	۳/۷	۳/۶	۴/۲	۴/۱	۳/۴	۳/۹	۴/۳	۳/۳	۴/۲



شکل 4- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه جوش الف- نمونه 11، ب-نمونه 8، ج- رسوبات انتخابی منطقه جوش در تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه 7 جهت آنالیز EDS، د- گراف آنالیز EDS رسوب 1(نمونه7) و ه- گراف آنالیز EDS رسوب 2 (نمونه 7).

است اندازه رسوبات Mg_2Si و Al_2CuMg تقریبا یکسان است. از لحاظ وضعیت ظاهری جوش نمونه‌ها وضعیت مناسبی ندارند. حتی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی برخی از ناپیوستگی‌ها و تخلخل‌ها قابل رویت است. طبق تصویر توزیع رسوبات Mg_2Si و Al_2CuMg غیریکنواخت است که موجب کاهش شدید درصد ازدیاد طول شد.در شکل (4-ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه 7 که با شرایط سرعت چرخش ابزار rpm 950، سرعت‌پیشروی mm/min 63، زاویه ابزار 3 درجه

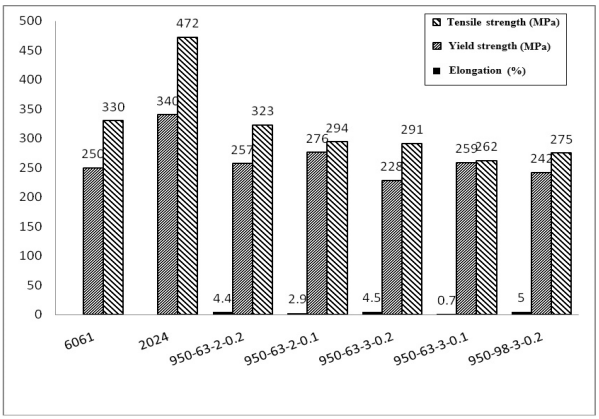
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

جدول 5- استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول.

شماره نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی(MPa)	درصد ازدیاد طول
۰۱	۲۵۷	۳۲۳	۴/۴
۰۲	۲۶۹	۲۹۹	۳/۵
۰۳	۲۳۹	۲۸۸	۳/۶
۰۴	۲۵۹	۲۶۲	۰/۷
۰۵	۲۴۲	۲۷۵	۵
۰۶	۱۹۵	۳۰۰	۴/۷
۰۷	۲۲۸	۲۹۱	۴/۵
۰۸	۲۶۴	۲۶۶	۰/۷
۰۹	۲۷۶	۲۹۴	۲/۹
۱۰	۲۲۸	۲۴۸	۳
۱۱	۲۲۳	۲۳۹	۰/۵
۱۲	۲۶۵	۲۹۷	۳/۷

عمق فروروی 0/2 mm نشان داده شده است که در آن دو رسوب شماره گذاری شده نمایش داده شده است. شکل (4-د) و (4-ه) آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس EDS در نمونه 7 را نشان می‌دهد. رسوب شماره 1 از نوع Al_2CuMg هستند که در خانواده آلیاژهای آلومینیم- مس – منیزیم تشکیل می‌شود و رسوب شماره 2 از نوع Mg_2Si هستند که در گروه آلیاژهای آلومینیم- منیزیم- سیلیسیم‌تشکیل می‌شود و همانطور که از آنالیز رسوب‌ها مشخص است هر دو نوع رسوب در منطقه جوش تشکیل شده‌اند.

استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های جوشکاری شده در جدول (5) ارائه شده است. تحقیقات صورت گرفته توسط مادهو و همکاران [20] بر روی اتصال آلیاژ 6262 و 7075 به روش اصطکاکی اغتشاشی بهترین استحکام کششی را 256/73 MPa گزارش داده است. بنابراین براساس نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر و با مقایسه با تحقیقات قبلی توسط سادیش [18] و مادهو [20] در قطر شانه 3 برابر قطر پین بهینه گرمای ورودی به منطقه جوش تامین می‌شود. هاتینگا و همکاران [21] استحکام کششی اتصال آلیاژ 2024 به روش FSW را با روش‌های ذوبی TIG و MIG مقایسه کرده‌اند که استحکام کششی جوش حاصل شده در روش‌های TIG، MIG و FSW به ترتیب 219، 221 و 289 مگا پاسکال بدست آمد که ماکزیمم استحکام بدست آمده در پژوهش پیش‌رو (323 MPa) در مقایسه با تحقیقات هاتینگا از شرایط مطلوبی برخوردار است.



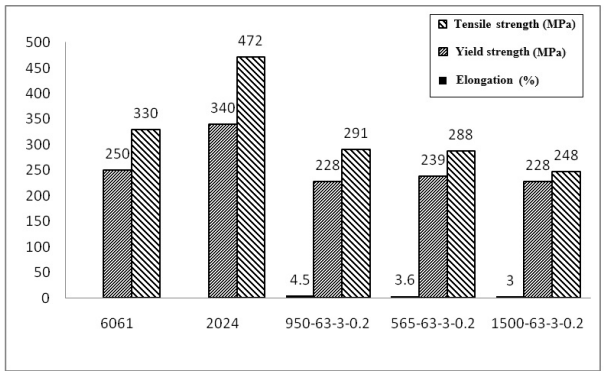
شکل 5- مقایسه نمودارهای استحکام کششی و استحکام تسلیم در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش 950 rpm (محور عمودی بسته به نوع ستون استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد افزایش طول است).

نتایج حاصل شده از آزمون کشش تک محوری نشان داد که در بین نواحی مختلف جوش، ضعیف‌ترین استحکام در نمونه‌های

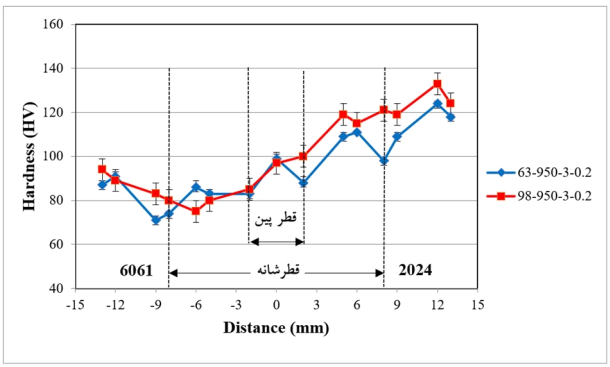
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

سالم ناحیه HAZ در سمت آلیاژ 6061 است. تمام نمونه‌های آزمون کشش از ناحیه HAZ شکسته شدند.

مطابق نمودار ستونی شکل (5) نمونه جوشکاری شده با شرایط سرعت چرخش ابزار 950 rpm، سرعت پیشروی 63 mm/min، زاویه ابزار 2 درجه و عمق فروروی 0/2 mm که استحکام کششی و تسلیم و درصد ازدیاد طول در نمودار سوم از سمت چپ نشان داده شده است، از شرایط مناسب‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر داراست.

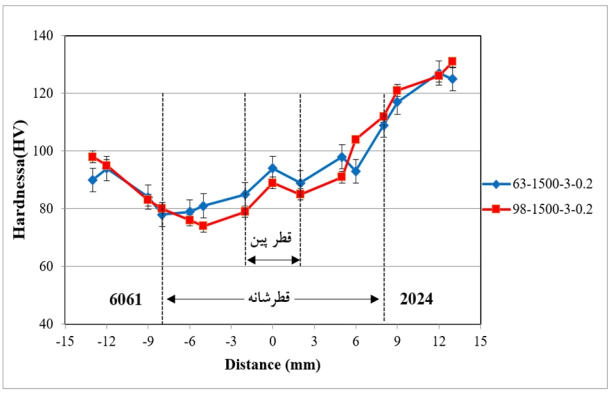


شکل 6- مقایسه نمودارهای استحکام کششی و استحکام تسلیم در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش متفاوت (محور عمودی بسته به نوع ستون استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد افزایش طول است).



شکل 7- رفتار سختی ناحیه جوش نمونه‌های فرایند شده با سرعت چرخش 950 rpm و سرعت پیشروی متفاوت.

نمودار چهارم از شرایط مناسب آزمون کشش برخوردار است البته اختلاف مختصری در استحکام کششی با فلزپایه 6061 مشاهده شد که می‌تواند ناشی از خطای دستگاه باشد. درصد ازدیاد طول در این نمونه 2/9 گزارش شد که نسبت به درصد ازدیاد طول نمونه با نمودار سوم از سمت چپ (4/4) از مقدار کمتری برخوردار است. ملاحظه می‌شود که با کاهش عمق فروروی ابزار در قطعه اختلاف بین استحکام کششی و استحکام تسلیم کم شده و درصد ازدیاد طول افت پیدا کرد.



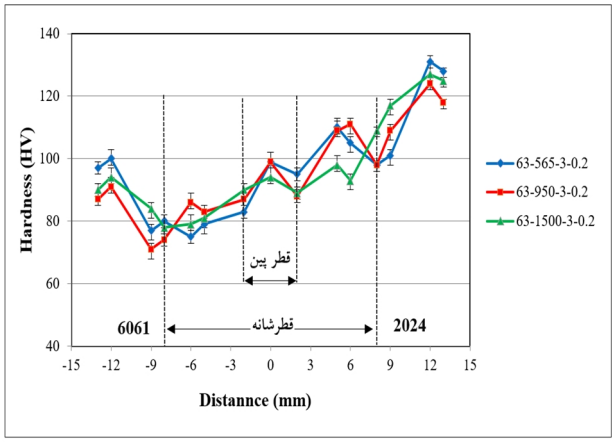
شکل 8- رفتار سختی ناحیه جوش نمونه‌های فرایند شده با سرعت چرخش 1500 rpm و سرعت پیشروی متفاوت.

راویکومار و همکاران [22] در اتصال آلیاژ 6061 به 7075 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت چرخش، استحکام افزایش یافته و در سرعت چرخش خیلی بالا با کاهش استحکام روبرو شدند. در سرعت‌های پایین به دلیل درگیری ناکافی پین، کمترین گرمای اصطکاکی جهت گردش و اختلاط مواد تولید شده و جوش با استحکام پایین بدست آمد. جوشکاری با سرعت‌های چرخشی خیلی بالا نیز استحکام کششی را به طور قابل توجهی پایین آورد. دلیل کاهش استحکام، افزایش بیش از حد گرمای ورودی و کاهش دانسیته نابجایی‌ها و درشت شدن رسوبات ارزیابی شده است [23]. رفتار استحکام کششی اتصال آلیاژ 2024 به 6061 در پژوهش حاضر با نتایج بدست آمده در تحقیق راوی کومار همخوانی دارد. نمودار ستونی شکل(6) خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده با شرایط سرعت چرخش متغیر و زاویه ابزار، سرعت پیشروی و عمق فروروی ثابت را نشان می‌دهد. طبق نمودار هر سه نمونه از شرایط قابل قبولی برخوردارند و در مقایسه استحکام کششی نمونه‌ها با بهینه استحکام کششی بدست آمده (194 MPa) در تحقیق سادیش و همکاران [20] نتایج مناسب ارزیابی شد. طبق مطالعات راویکومار و همکاران [22] جوشکاری با سرعت‌های

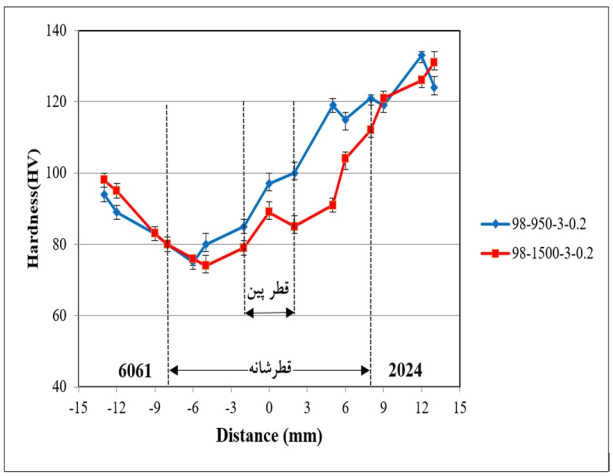
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

چرخشی خیلی بالا نیز استحکام کششی را به طور قابل توجهی پایین آورد. دلیل کاهش استحکام، افزایش بیش از حد گرمای ورودی و کاهش دانسیته نابجایی‌ها و درشت شدن رسوبات Mg_2Si و Al_2CuMg ارزیابی شد. به طور کلی استحکام کششی به شدت وابسته به کیفیت جوش و عدم مشاهده عیوب جوش در منطقه جوش است. دو عامل محل عیب و حداقل سختی به عنوان عوامل اصلی تعیین کننده محل شکست در اتصالات هستند به طوری که در نمونه‌هایی که عیبی دیده نشود محل مرتبط با حداقل سختی عامل شکست است. شکست در آزمون کشش در اتصالات لب به لب FSW معمولا درمحل‌هایی با کمترین سختی رخ می‌دهد.



شکل 9- رفتار سختی ناحیه جوش نمونه های فرایند شده با سرعت پیشروی 63 میلی‌متر در دقیقه و سرعت چرخش ابزار متفاوت.



شکل 10- نمودار رفتار سختی ناحیه جوش نمونه‌های فرایند شده با سرعت پیشروی 98 میلی‌متر در دقیقه و سرعت چرخش ابزار متفاوت.

در جوش‌های معیوب دو عامل تعیین کننده محل شکست هستند 1) تمرکز تنش در محل عیب 2) توزیع سختی در مقطع جوش، که غلبه هر کدام با توجه به شرایط حاکم بر روی نمونه عامل بروز شکست می‌شود. در جوش‌های معیوب بزرگ بودن عیب، تمرکز تنش زیادی به همراه خواهد داشت و در نتیجه تمرکز تنش در عیب بر عامل سختی غلبه کرده است و باعث بروز شکست در منطقه عیب می‌شود ولی در مناطقی که اندازه عیوب خیلی کوچک (در حد صدم میلی‌متر) هستند این امکان وجود دارد که تمرکز تنش در محل عیب غالب نبوده و شکست در محل کمترین سختی رخ دهد.

برای بررسی رفتار ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده در منطقه جوش با توجه به پارامترهای جوشکاری از قبیل سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی، زاویه ابزار با قطعه و عمق فروروی در چند دسته نمودارها طبقه‌بندی شد که در هر طبقه به بررسی یک فاکتور متغیر با ثابت فرض کردن بقیه فاکتورها پرداخته شد. شکل(7) نمودار رفتار سختی نمونه‌هایی که با شرایط یکسان سرعت چرخش ابزار 950 rpm، زاویه ابزار 3 درجه و عمق فروروی شانه 0/2 mm جوشکاری شده‌اند را نشان داده است. سرعت پیشروی به عنوان فاکتور متغیر در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است در شرایط یکسان افزایش سرعت جوشکاری موجب افزایش سختی گردید. در سرعت دورانی ثابت با افزایش سرعت جوشکاری اندازه دانه از 4/1 به 3/6 µm کاهش یافت. کاهش اندازه دانه را حرارت ورودی کمتر و در نتیجه مهیا نشدن شرایط تبلور مجدد می‌توان عنوان کرد. به دلیل حرارت کمتر رسوبات Mg_2Si و Al_2CuMg بیشتری پایدار مانده و سختی افزایش یافت.

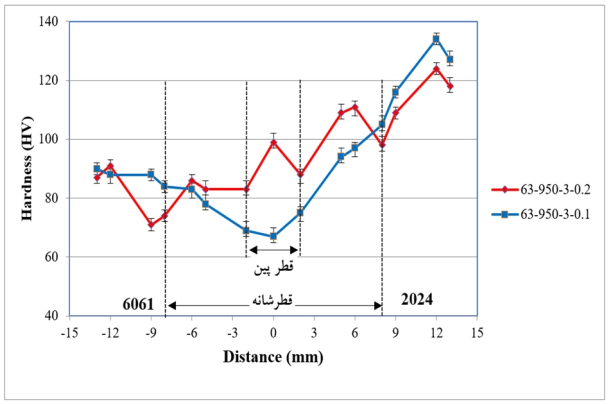
شکل(8) نمودار رفتار سختی نمونه‌هایی که با شرایط یکسان سرعت چرخش ابزار 1500 rpm، زاویه ابزار 3 درجه و عمق فروروی شانه 0/2 mm جوشکاری شده‌اند را نشان می‌دهد. سرعت پیشروی به عنوان فاکتور متغیر در نظر گرفته شد. در سرعت چرخش 1500 rpm طبق نمودار با افزایش سرعت جوشکاری به طور نسبی سختی کاهش یافت. با کاهش سرعت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

پیشروی در سرعت دورانی ثابت 1500 rpm حرارت ورودی افزایش می‌یابد. یکی از عواملی که بر روی اندازه دانه در منطقه جوشکاری تاثیر دارد میزان کار مکانیکی در زمینه آلومینیم است. با کاهش سرعت پیشروی، کار مکانیکی بیشتر و دانه‌های بیشتری از زمینه فلزی خرد و شکسته شده و همچنین در این حالت توزیع ذرات یکنواخت‌تر و پراکندگی بهتر صورت گرفت. حضور رسوبات Mg_2Si و Al_2CuMg و توزیع مناسب آن‌ها باعث افزایش سختی SZ نسبت به TMAZ و HAZ شده است. در تحقیقات مادهو و همکاران [20] بر روی اتصال آلیاژ 6262 به 7075 رسوبات Mg_2Si و Al_2Zn هر دو در منطقه اغتشاش حضور دارند و سختی به سمت TMAZ در دو طرف SZ کاهش می‌یابد و سپس به سمت BM افزایش می‌یابد. این محققین محدوده 80 تا 140 HV را بهترین محدوده سختی گزارش داده است.

شکل (9) نمودار رفتار سختی نمونه‌هایی که با شرایط یکسان سرعت پیشروی 63 mm/min، زاویه ابزار 3 درجه و عمق فروروی شانه 0/2 mm و سرعت‌چرخش‌ابزار متفاوت جوشکاری شده‌اند را نشان می‌دهد. همانطور در نمودار مشخص است رفتار سختی نمونه‌های جوشکاری شده، طبق انتظار در منطقه HAZ آلیاژ 6061 کاهش یافت. در مقایسه افزایش سرعت چرخشی دو اثر متفاوت بر اندازه دانه ناحیه اغتشاش خواهد داشت. اول اینکه با افزایش سرعت چرخشی میزان حرارت ورودی افزایش خواهد یافت که باعث افزایش اندازه دانه ناحیه اغتشاش می‌شود و دوم اینکه با افزایش سرعت چرخشی، میزان تغییر شکل پلاستیکی افزایش خواهد یافت که این امر در نهایت باعث کاهش اندازه دانه می‌گردد. یکی از دو اثر به عنوان فاکتور غالب، تاثیر افزایش سرعت چرخشی بر اندازه دانه را مشخص خواهد کرد. با توجه به افزایش اندازه دانه به ترتیب از 2/9 به 4/1 و 4/3 µm با افزایش سرعت مشخص است که حرارت ورودی فاکتور تاثیرگذار و غالب می‌باشد.

شکل (10) نمودار رفتار سختی نمونه‌هایی که با شرایط یکسان سرعت پیشروی 98 mm/min، زاویه ابزار 3° و عمق فروروی شانه 0/2 mm و سرعت چرخش ابزار متفاوت جوشکاری شده‌اند را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است کمترین سختی در منطقه TMAZ در مجاورت آلیاژ 6061 مشاهده شد، نمودار نمونه‌ای که با سرعت چرخش 950 rpm جوشکاری شده سختی بالاتری را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت دورانی از 950 rpm به 1500 rpm گرمای ورودی افزایش می‌یابد. افزایش گرمای ورودی با انحلال بیشتر رسوبات موجب افزایش اندازه دانه از 3/6 به 4/7 µm شده و همین امر باعث افت سختی تا حداکثر 20 ویکرز شده است.



شکل 11- نمودار رفتار سختی ناحیه جوش نمونه‌های فرایند شده با سرعت چرخش 950 rpm و عمق فروروی متفاوت.

در شکل (11) فاکتورهای سرعت پیشروی 63mm/min، سرعت چرخش 950 rpm، و زاویه ابزار 3 درجه به عنوان فاکتور ثابت در دو نمونه در نظر گرفته شدو عمق فروروی متغیر طراحی گردید. نمونه‌ای که با عمق فروروی 0/2 mm جوشکاری شده شرایط مناسب‌تری از لحاظ سختی در مرکز جوش دارد. ولی سختی در منطقه HAZ آلیاژ 6061 کاهش یافت. در نمونه جوش شده با عمق فروروی 0/1 mm، با توجه به نمودار سختی، مرکز جوش دچار افت شدید سختی گردید که علت ناشی از کاهش گرمای ورودی و عدم توزیع یکنواخت رسوبات Mg_2Si و Al_2CuMg ارزیابی شد.

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم 6061 و 2024

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

پرداخته شد. نتایج حاصل شده را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- در جوشکاری FSW آلیاژهای 6061 و 2024 با سرعت چرخش 565 rpm بهینه خواص مکانیکی در سرعت پیشروی 98 mm/min و عمق فروروی 0/2 mm در محدوده آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد. استحکام کششی 299 MPa و سختی مناسب در کنار کیفیت بالای جوش از دلایل انتخاب بهینه نمونه جوشکاری شده در شرایط مذکور بوده است که گرمای ورودی مناسب و توزیع یکنواخت رسوبات از عمده علل آن پیش‌بینی می‌شود.
- در جوشکاری آلیاژهای 6061 و 2024 با روش FSW و با سرعت چرخش 950 rpm بهینه خواص مکانیکی در سرعت پیشروی 63 mm/min و عمق فروروی 0/2 mm در محدوده آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد. استحکام کششی 323 MPa و سختی مناسب در کنار کیفیت بالای جوش از دلایل انتخاب بهینه نمونه جوشکاری شده در شرایط مذکور بوده که گرمای ورودی مناسب و توزیع یکنواخت رسوبات از عمده علل آن پیش‌بینی می‌شود.
- در فرایند جوشکاری آلیاژهای 6061 و 2024 با روش FSW و با سرعت چرخش ابزار 1500 rpm بهینه خواص مکانیکی در سرعت پیشروی 98 mm/min و عمق فروروی 0/2 mm در محدوده آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد. استحکام کششی 300 MPa و سختی مناسب در کنار کیفیت بالای جوش از دلایل انتخاب بهینه نمونه جوشکاری شده در شرایط مذکور بوده است.
- بیشترین استحکام کششی با مقدار 323 MPa مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 950 rpm، سرعت پیشروی 63 mm/min، عمق فروروی 0/2 mm و زاویه 2 درجه بدست آمد.
- ضعیف‌ترین ناحیه جوش از جهت استحکام کششی و سختی مربوط به منطقه متاثر از حرارت در سمت آلیاژ 6061 ارزیابی شد.

منابع

1- V.S.R. Murthy, A.K. Jena, K.P. Gupta, G.S. Murthy, Structure and properties of engineering materials, McGraw-Hill, New York, 2003.

2- J. Adamowski, M. Szkodo, "Friction stir welds (FSW) of aluminum alloy AW6082-T6", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 20, 2007, pp. 403-406.

3- K.V.P. P Chandu, E. Venkateswara Rao, A. Srinivasa Rao, B.V. Subrahmanyam, "The strength of friction stir welded aluminum Alloy 6061", *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, Vol. 4, 2014, pp.119-122.

4- M.M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, "Effect of pre and post welding heat treatment in SiC-fortified dissimilar AA6061-AA2024 FSW butt joint", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30, 2017, pp. 97–105.

5- R.S. Mishra, Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing, center for friction stir processing", *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, 2005, pp. 1–78.

6- A. Goloborodko, T. Ito, X. Yun, Y. Motohashi, G. Itoh, "Friction stir welding of a commercial 7075-T6 aluminum alloy: grain refinement, thermal stability and tensile properties", *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 8, 2004, pp. 2503-2508.

7- S. Gholami Shiri, A. Sarani, S.R. Elmi Hosseini, G. Roudini, "Diffusion in FSW joints by inserting the metallic foils", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 7, 2013, pp. 1-5.

8- I. Radisavljevic, A. Zivkovic, N. Radovic, V. Grabulov, "Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, 2013, pp. 3525-3539.

9- N. Kumar, W. Yuan, R.S. Mishra friction stir welding of dissimilar alloys and materials. Elsevier; 2015.

10- N. T. Kumbhar1, K. Bhanumurthy, "Friction stir welding of Al 5052 with Al 6061 Alloys", *Journal of Metallurgy*, Vol. 1, 2012, pp.1-7.

11- M. Indira Rani, R. N. Marpu and A. C. S. Kumar, "A study of process parameters of friction stir welded AA6061 aluminum alloy in O and T6 conditions", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 2, 2011, pp. 61-66.

12- A. Daneji, M. Ali, S. Pervaiz, "Influence of tool geometry and processing parameters on welding defects and mechanical properties for friction stir welding of 6061 Aluminum alloy", *Materials Science and Engineering* 346, 2018, pp. 1-9.

13- D. Ghahremani Moghadam, K. Farhangdoost, "Influence of welding parameters on fracture toughness and fatigue crack growth rate in friction stir welded nugget of 2024-T351 aluminum alloy joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, 2016, pp. 2567−2585.

14- S.T. Amancio-Filho, S. Sheikhi, J.F. dos Santos, C. Bolfarini, "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminum alloys 2024-T351 and 6056-T4" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 206,

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]

Aluminum alloy joints", Forces in Mechanics, Vol. 4, 2021, pp. 1-8.
20- R. Madhusudhan, M.M.M. Sarcar, N. Ramamaiah, K. Prasada Rao "An experimental study on the effect of weld parameters on mechanical and micro structural properties of dissimilar aluminum alloy FS welds", International Journal of Modern Engineering Research, Vol. 2, 2012. pp. 1459-1463.
21- D.G. Hattingha, C. Blignaulta,c, T.I. Van Niekerka, M.N Jamesa,b, "Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 203, 2008, pp. 46–57.
22- S. Ravikumar, V. Seshagiri Rao and R. V. Pranesh, "Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded dissimilar materials between AA6061-T651 and AA7075-T651 alloys", International Journal of Advanced Mechanical Engineering, Vol. 4, 2014, pp. 101-114.
23- R. Jabraeili, H. R. Jafarian, R. Khajeh, N. Park, Y. Kim, A. Heidarzadeh, A. R. Eivani, "Effect of FSW process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar AA2024 Al alloy and 304 stainless steel joints", Materials Science & Engineering A, Vol. 814, 2021, pp. 1-13.
Issues 1–3, 2008, pp. 132-142.
15- R. Kumar, S. Singh, R.S. Mishra, "Optimization of friction stir welding process parameters during joining of aluminum alloys of AA6061 and AA6082", Materials Todays: Proceedings, Vol. 45, Part 6, 2021, pp. 5368-76.
16- P. Satish Kumar, M. Shiva Chander, "Effect of tool pin geometry on FSW dissimilar aluminum alloys - (AA5083 & AA6061)", Materials Todays: Proceedings, Vol. 39, Part 1, 2021, pp. 472-477.
17- S. Jannet, P.K. Mathews, R. Raja, Comparative investigation of friction stir welding and fusion welding of 6061-T6 and 5083-O aluminum alloy based on mechanical properties and microstructure", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 61(2), 2013, pp. 181-186.
18- P. Sadeesh, M. Venkatesh Kannan,V. Rajkumar, P. Avinash , N. Arivazhagan ,K. Devendranath Ramkumar, S. Narayanan, "Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals", Procardia Engineering, Vol. 75, 2014, pp. 145-149.
19- C. Rajendran C, A. Abdulriyazdeen, S. Abishek, A. Aatheeshwaran, A. Akash, "Prediction of relationship between angular velocity to the pitch line velocity (ω/v) on tensile strength of friction stir welded AA2014-T6

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-09-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.9.2]